

钹手册

212科技图书馆《钹手册》翻译组

1972

第 25 章 钚的外照射剂量的控制

由于钚在军事上具有重要意义，所以它也许是一种最重要的人造元素。在过去的二十年间，钚元素所带来的危害只局限在较小的范围。但是，随着全世界动力反应堆的数量不断增加，目前钚已经以前所未有的规模大量生产。据估计到本世纪末，全世界动力堆的年产钚量将以吨来计算。钚产量的增加和生产场所的增多，势必带来高辐照钚的辐射危害问题，因此有必要专就操作钚的外照射危害问题作一评述。

由于钚是 α 辐射体，因此过去有一种倾向，这就是只考虑钚摄入体内后对身体造成的危害。这种倾向在考虑少量钚的危害性时不会有多大问题，这是因为对钚规定的最大容许体负荷量非常之低。但是，正如 Watson^[1] 和 Unruh^[2] 所强调指出的，即使在屏蔽良好的密封橱内表面上有一层薄薄的钚，则在操作钚时也有手部剂量问题。实际上，对大量钚来说，它的 X 射线、 γ 射线和中子辐射造成的外照射是相当可观的。对于高辐照钚，由于 Pu^{238} 、 Pu^{241} 及其子体和 Pu^{242} 的含量增加，外照射的问题就变得更为重要了。

25—1 钚同位素的辐射性质

若要防止钚的外照射造成危害，则必须了解各种钚同位素和钚的化合物的辐射种类及辐射能量；同时还必须考虑钚中所含裂变产物的辐射。

25—1.1 钚同位素及某些子体的带电粒子辐射

表 25.1 列出了各种钚同位素的带电粒子辐射及其衰变常数。表中所列数据除另有说明的以外，均援引自 Strominger^[3] 等人给出的资料。

25—1.2 钚同位素及某些钚化合物的中子辐射

次临界量的钚，其中子来源有二：

①自发裂变；

②低原子序数物质中的 (α, n) 反应。

自发裂变和某些 (α, n) 反应产生的中子辐射列在表 25.2 中。自发裂变的数据援引自 Strominger 等^[3] 和 Soodak^[6] 的资料， (α, n) 反应的数据援引自 Steindler^[6] 给出的资料。Steindler 给出的 (α, n) 反应产生的中子辐射数据，系根据 Segre 和 Wiegand^[7] 的资料以及 Roberts^[8] 的资料估算得到的。

Cranberg^[9] 等人给出了一个铀裂变中子能谱的经验公式：

表25.1 钚同位素及某些子体的带电粒子辐射〔 10^3 〕

同位素	半衰期	比放射 性 居里/克同位素	α 辐射		β 辐射		子 同位素	体 半衰期
			兆电子伏	相对强度%	兆电子伏	相对强度%		
Pu ²³²	36分	2.3×10^7	6.58	100			U ²²⁸	9.3分
Pu ²³³	20分	4.0×10^7	6.30	100			U ²²⁹	58分
Pu ²³⁴	9.0小时	1.5×10^6	6.19	100			U ²³⁰	20.8天
Pu ²³⁵	26分	9.3×10^7	5.85	100			U ²³¹	4.3天
Pu ²³⁶	2.87年	5.32×10^2	5.763	69			U ²³²	74年
			5.716	31				
			5.610	0.18				
Pu ²³⁷	45.6天	1.2×10^4	5.65	21				
			5.36	79				
Pu ²³⁸	8.64×10^4 年	1.74×10^1	5.495	72			U ²³⁴	2.48×10^5 年
			5.452	23				
			5.352	0.09				
			5.208	5×10^{-3}				
Pu ²³⁹	2.436×10^4 年	6.147×10^{-2}	5.147	72.5			U ²³⁵	7.1×10^8 年
			5.134	16.8				
			5.096	10.7				
			5.064	3.7×10^{-2}				
			4.999	1.3×10^{-2}				
			4.917	5×10^{-3}				
Pu ²⁴⁰	6.58×10^3 年	2.27×10^{-1}	5.162	76			U ²³⁶	2.39×10^7 年

Pu^{241}	1.30×10^1 年	4.56×10^{-3}	5.118 5.014 4.893	24 0.1 75			U^{237}	6.75 天
Pu^{242}	3.79×10^5 年	1.14×10^{-2} 3.90×10^{-3}	4.848 4.898 4.858	25 76 24	0.021	100	Am^{241} U^{238}	458 年 4.51×10^8 年
Pu^{243}	4.98 小时	2.59×10^8			0.579 0.490	62 38	Am^{243}	7.95×10^3 年
Pu^{244}	7.6×10^7 年	1.9×10^{-5}	4.55 ⁽⁴⁾				U^{240}	14.1 小时
Pu^{245}	10.1 小时	1.27×10^6			0.15	73	Am^{245}	1.98 小时
Pu^{246}	11 天	4.9×10^4			0.33	27	Am^{246}	25 分
Am^{241}	4.58×10^2 年	3.24	5.534 5.500 5.477 5.435 5.378 5.311	0.35 0.23 85 12.6 1.7 1.2×10^{-2}			Np^{237}	2.20×10^6 年
U^{237}	6.75 天	8.16×10^4			0.249 0.084	74 26	Np^{237}	2.20×10^6 年

* 表中 Am^{241} 和 U^{237} 的比放射性单位是居里/克 Pu^{241}

表25.2 钚同位素和某些钚化合物的中子辐射^[8,5,6]

同位素	半衰期 年	比 放 射 性 衰变/秒·克同位素	ν 中子/裂变	自 发 裂 变 中子/秒·克同位素	(α, n)* 中子/秒·克同位素
Pu ²³⁸	3.5×10^9	1.6×10^4	2.30	3.7×10^4	
Pu ²³⁸	3.8×10^{10}	1.46×10^3	2.33	3.40×10^3	
Pu ²³⁸ F ₄					2.1×10^6
Pu ²³⁸ O ₂					1.4×10^4
Pu ²³⁹	5.5×10^{15}	1.02×10^{-2}	3.0	3.0×10^{-2}	
Pu ²³⁹ F ₄					4.3×10^3
Pu ²³⁹ O ₂					4.5×10^1
Pu ²⁴⁰	1.22×10^{11}	4.52×10^2	2.25	1.02×10^3	
Pu ²⁴⁰ F ₄					1.6×10^4
Pu ²⁴⁰ O ₂					1.7×10^2
Pu ²⁴²	7.1×10^{10}	7.8×10^2	2.18	1.7×10^3	
Pu ²⁴² F ₄					1.7×10^2
Pu ²⁴² O ₂					2.7
Pu ²⁴⁴	2.5×10^{10}	2.2×10^3	2.3*	5.1×10^3	

* 估计值

$$N(E) = K E^{1/2} \exp(-0.775 E) \quad (25.1)$$

式中, $N(E)$ = 每单位能量间隔的中子数; E = 中子能量 (兆电子伏); K = 常数。

虽然目前还没有得出PuF和PuO的中子能谱数据,但可以指出其中子能量是在快区,估计平均能量在0.75到1.5兆电子伏之间^[6]。

25-1.3 钚同位素、钚同位素的某些子体 以及裂变产物的电磁辐射

钚的电磁辐射来源有四:

- (1) α 衰变产生的 γ 辐射;
- (2) 内转换X射线;
- (3) 自发裂变产生的 γ 辐射;
- (4) 自发裂变产生的裂变产物的 γ 辐射。

现将这些辐射列在表25.3中。Pu²³²、Pu²³³、Pu²³⁴、Pu²³⁵和Pu²⁴⁵的 γ 和X射线,目前尚无测量值。

每克Pu²⁴¹中Am²⁴¹和U²³⁷的居里数与钚提纯以后的时间有关。当时间远小于14年时,每克初始时是纯的Pu²⁴¹中的Am²⁴¹居里数,与下列公式的计算值非常接近:

$$\text{居里/克钚}^{241} = 4.74 \times 10^{-4} t \quad (25.2)$$

式中, t = 钚提纯以后的天数。

当时间远小于14年时, 每克初始时是纯的 Pu^{241} 中 U^{237} 的居里数由下式给出:

$$\text{居里/克钚}^{241} = 5.0 \times 10^{-3} (1 - e^{-0.102t}) \quad (25.3)$$

除了另有说明以外, 伴随 α 衰变产生的 γ 射线的比放射性都是按下列办法估算的: 将每次 α 衰变发射的 γ 射线数乘以钚同位素的 α 比放射性, 或乘以由公式(25.2) 和(25.3) 给出的 Pu^{241} 子体的比放射性。 Pu^{237} 和 Pu^{242} 每次 α 衰变发射的 γ 射线数目前尚不知道, 但 Pu^{242} 每次 α 衰变发射的 γ 射线数假设与其它钚同位素发射的 40 仟电子伏辐射相同。

Pu^{239} 的内转换 X 射线能谱是实验测得的数据^[10], 其它同位素的内转换 X 射线其能量均假定为 17 仟电子伏。内转换系数 e/γ 是转换的电子数与未转换的 γ 射线数之比。内转换 X 射线的比放射性大致等于: 内转换系数乘以每次 α 衰变发射的 γ 射线数, 再乘以荧光产额, 再乘以钚同位素的 α 比放射性或乘以公式(25.2) 和 (25.3) 给出的 Am^{241} 和 U^{237} 的比放射性。对于所有能量的内转换 X 射线, 其荧光产额均取为 0.4。

自发裂变 γ 射线的比放射性是在假定每次裂变辐射 7.5 个 γ 射线、每个 γ 射线的能量为 1 兆电子伏的情况下估算得到的。自发裂变的裂变产物 γ 射线的比放射性是在假定每次裂变所产生的裂变产物发射出 5 个 γ 射线、每个射线的能量为 1 兆电子伏的情况下估算得到的。

25—2 剂量率的计算方法

钚是在反应堆中由铀的中子俘获反应产生的。图 25.1 表示钚同位素及其子体的生成方式^[3]。一般说来, 连续辐照铀和钚的结果, 将消耗掉 Pu^{239} , 生成更多的 Pu^{240} 、 Pu^{241} 、 Pu^{242} 及更重的钚同位素。动力反应堆中生产的钚中, Pu^{239} 、 Pu^{240} 和 Pu^{241} 对剂量的贡献是主要的。在燃料燃耗很深的情况下, 可以认为 Pu^{238} 和 Pu^{242} 也具有同样重要的作用。

25—2.1 表面剂量率

通常所遇到的问题是, 需要确定钚的中子、 γ 和 X 射线对操作大块钚的工作人员手部产生的剂量率。在资料(11)和(12)中, 对钚的 X 和 γ 射线的剂量率计算介绍了两种推导方法。这两篇资料处理的问题是确定半无限机体组织介质与发射能量为 $h\nu$ 的 γ 射线和 X 射线的高原子序数的半无限介质分界面附近的剂量率, 因此与计算操作大块钚的手部剂量问题相差不多。在大多数情况下, 这种处理问题的方法是一个很好的近似。

Roesch^[12] 假设钚在机体组织中的暴射量(exposure)等于机体组织中的吸收剂量, 由此得出大块钚表面剂量率的计算公式。Roesch 指出, 当操作者戴有一付厚度至少为 50 毫克/厘米² 的手套时, 他的这个假设是正确的。Roesch 导出的公式为:

$$D = B (F h\nu (\mu_{en}/\rho)_t + F_t h\nu_t (\mu_{en}/\rho)_{tt}) \quad (25.4)$$

表25.3 钚同位素、钚同位素的某些子体以及裂变产物的电磁辐射

同位素	α 衰变产生的 γ		内转换 X 射线		裂变产物 γ 居里/克同位素
	能量 兆电子伏	居里/克同位素	能量 千电子伏	e/ γ	
Pu ²³⁹	0.047	1.7×10^{-1}	17	1000	3.2×10^{-8}
	0.110	6.4×10^{-2}	17	14	2.2×10^{-6}
	0.165	3.5×10^{-3}			
Pu ²³⁷	0.0332				
	0.0435				
	0.0556				
	0.0596				
	0.0764				
	0.0960				
Pu ²³⁸	0.0438	6.6×10^{-3}	17	740	2.9×10^{-7}
	0.099	1×10^{-3}	17	11	1.9×10^{-7}
	0.150	2×10^{-4}			
	0.203	7×10^{-7}			
	0.760	9×10^{-6}			
	0.810				
Pu ²³⁹	0.875	3×10^{-6}			
	0.037	1×10^{-6}	13.6		2.1×10^{-12}
	0.052	4×10^{-6}	17.4		1.4×10^{-12}
	0.120	6×10^{-7}	20.5		
	0.207	2×10^{-7}			
	0.34	3×10^{-7}			

Pu^{240}	0.38	6×10^{-7}	17	$9.1 \times 10^{-3*}$	9.2×10^{-8}	6.1×10^{-8}
	0.42	4×10^{-7}				
	0.04528	$2 \times 10^{-5*}$				
	0.145	1.3×10^{-6}				
	0.045	$3.9 \times 10^{-7*}$				
Pu^{241}	0.0122	3×10^4	17	1.9×10^5	1.6×10^{-7}	1.1×10^{-7}
	0.0297					
	0.0367					
	0.0422					
	0.054					
Pu^{242}	0.0840	5.4×10^5	17	4.3×10^5	4.4×10^{-7}	3.0×10^{-7}
	0.096					
	0.134					
	0.381					
	0.027					
Pu^{243}	0.047	2×10^4	17	1.9	0.23	$3.1 \times 10^{-5}t$
	0.08					
	0.099					
	0.175					
	0.215					
Am^{241}	0.02636	$1.1 \times 10^{-5}t$	17	7	>240	$6.8 \times 10^{-5}t$
	0.03320	$7.1 \times 10^{-7}t$	17	>240		
	0.04346	$3.5 \times 10^{-7}t$	17	<1.5		
	0.05957	$1.7 \times 10^{-4}t$	17	<1.5		
			17			

表25.3 钚同位素、钚同位素的某些子体以及裂变产物的电磁辐射 (续)

同位素	α 衰 变 产 生 的 γ		内 转 换 X 射 线		裂 变 γ	
	能 量 兆电子伏	居里/克同位素	能 量 电子伏	e/γ	居 里	裂 变 产 物 居 里 克同位素
Am ²⁴¹	0.103	9.0×10 ⁻⁸ t				
	0.113	1.1×10 ⁻⁸ t				
	0.130	1.8×10 ⁻⁸ t				
	0.159	1.4×10 ⁻⁹ t				
	0.210	2.8×10 ⁻⁹ t				
	0.27	3.6×10 ⁻¹⁰ t				
	0.33	1.1×10 ⁻⁹ t				
	0.37	7.1×10 ⁻¹⁰ t				
	0.0264					
	0.0332					
U ²³⁷	0.0435					
	0.0596	1.8×10 ⁻³ (1-e ^{-0.102t})				
	0.0648	1.2×10 ⁻⁴ (1-e ^{-0.102t})				
	0.1139					
	0.1646	1.8×10 ⁻⁴ (1-e ^{-0.102t})	17	0.13	9.5×10 ⁻⁶ (1-e ^{-0.102t})	
	0.2079	1.2×10 ⁻³ (1-e ^{-0.102t})	17	2.3	1.1×10 ⁻³ (1-e ^{-0.102t})	
	0.2342					
	0.2675	4.3×10 ⁻⁵ (1-e ^{-0.102t})	17	0.63	1.1×10 ⁻⁶ (1-e ^{-0.102t})	
	0.3323	7.0×10 ⁻⁵ (1-e ^{-0.102t})	17	0.04	1.1×10 ⁻⁶ (1-e ^{-0.102t})	
	0.3353	1.0×10 ⁻⁵ (1-e ^{-0.102t})	17	0.2	8.0×10 ⁻⁷ (1-e ^{-0.102t})	
	0.3685					
	0.371					

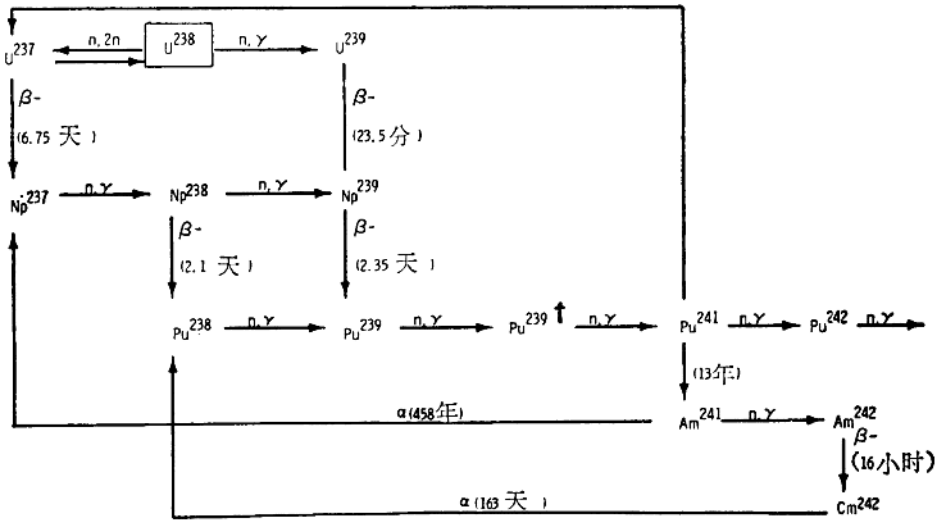


图25.1 钚同位素及其子体的生成方式^[2] (图中↑处应为 Pu^{240})

式中, $D = \gamma$ 和 X 射线的表面剂量率;

F = 未经散射到达钚与机体组织交界面处的 γ 射线通量;

$h\nu$ = 光子能量;

$(\mu_{en}/\rho)_t$ = 机体组织对初级 γ 射线的质量能量吸收系数;

$h\nu_f$ = 荧光 X 射线的能量;

$(\mu_{en}/\rho)_f$ = 机体组织对荧光 X 射线的质量能量吸收系数;

F_f = 荧光 X 射线在介质分界面处的通量;

B = 反散射校正因子。

这个表达式考虑了以下几个方面:

- ① 未经散射到达分界面的 γ 射线通量;
- ② 被机体组织反散射到达分界面处的 γ 和 X 射线通量;
- ③ 荧光 X 射线通量。

对每一种能量由公式(25.4)计算得到的剂量率均归一到 1 居里/克的比放射性, 其结果与能量的关系表示在图25.2中。

根据图25.2中的数据和表25.3中所列出的比放数据, 即可计算所考虑的每一种同位素的 γ 和 X 射线表面剂量率, 现将计算结果列在表25.4中。根据表 25.4 最后一列所列数据可以导出以下计算 γ 和 X 射线表面剂量率的公式:

$$D_{x+\gamma} = 960P_{238} + 0.98P_{239} + 4.7*P_{240} + 0.30P_{242} + 0.19P_{241}t + 17P_{241}(1 - e^{-0.102t}) \quad (25.5)$$

式中, $D_{x+\gamma}$ = γ 和 X 射线表面剂量率, 拉特/小时;

P_i = 每一种同位素的重量百分数;

*原文中此系数为11, 现按表25.4所列数值改为4.7——译者注。

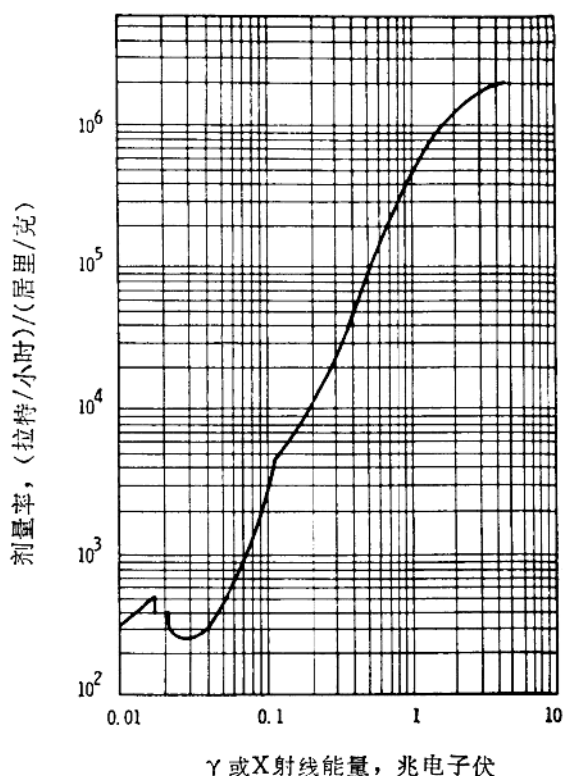


图25.2
接触铀时机体组织的剂量
率和射线能量的关系^[12]

t = 铀提纯以后的时间, 天。

对于 γ 辐射剂量亦可导出类似的公式:

$$D_{\gamma} = 7.8P_{238} + 0.075P_{239} + 0.069P_{240} + 0.11P_{242} + 0.10P_{241}t + 16P_{241}(1 - e^{-0.102t}) \quad (25.6)$$

式中, D_{γ} = γ 射线表面剂量率, 拉特/小时。

由于不知道铀的自发裂变中子能谱, 因此, 用铀的热中子裂变谱去计算中子表面剂量。计算得到的单位中子通量密度相应的剂量率为0.115(毫伦姆/小时)/(中子/厘米²·秒)^[12]。

Roesch^[12]导出了半径为 a 的铀球表面中子剂量率表示式:

$$D_a = \frac{2.53 \times 10^{-4} n M^{1/3}}{\rho} \quad (25.7)$$

式中, D_a = 表面中子剂量率, 伦姆/小时;

$\frac{n}{\rho}$ = 每克铀每秒钟所发出的中子数;

M = 铀的质量, 克。

n/ρ 的数值如表25.2中第5列所示。如果 P_i 是每种铀同位素的重量百分数, 则

$$D_a = 2.53 \times 10^{-4} (3420P_{238} + 0.030P_{239} + 1020P_{240} + 1700P_{242}) M^{1/3} \approx (0.865P_{238} + 0.258P_{240} + 0.43P_{242}) M^{1/3} \quad (25.8)$$

根据钚的X和γ射线表面剂量率、γ射线表面剂量率以及中子表面剂量率的计算公式(25.5)、(25.6)、(25.8)，就可以计算出具有不同钚同位素丰度的大块钚的表面剂量率。

25-2.2 非表面剂量率

Roesch^[12] 导出了一个距离钚源为 r 处的X和γ射线剂量率的统一表示式。他假定距离源任意距离处的剂量率 D_r 与源的投射面积 A 在观测点所张的立体角 Ω 成正比：

$$D_r = K \Omega_r, \quad (25.9)$$

$K = \text{常数}$

在源的表面有：

$$D_s = K \Omega_s = 2 \pi K \quad (25.10)$$

在距离远大于源的线度时：

$$D_r = K \Omega_r = \frac{KA}{r^2} \quad (25.11)$$

公式(25.11)除以(25.10)得：

$$D_r = \frac{AD_s}{2 \pi r^2} \quad (25.12)$$

将公式(25.5)代入(25.12)得：

$$\begin{aligned} D_r &= (960P_{238} + 0.98P_{239} + 4.7P_{240} + 0.30P_{242} + 0.19P_{241}t \\ &\quad + 17P_{241}(1 - e^{-0.102t}))A / 2 \pi r^2 \\ &= (150P_{238} + 0.16P_{239} + 0.75P_{240} + 0.048P_{242} + 0.030P_{241}t \\ &\quad + 2.7P_{241}(1 - e^{-0.102t}))A / r^2 \end{aligned} \quad (25.13)$$

如果已知每种钚同位素的重量百分数，钚分离后的时间以及钚的质量，则可根据公式(25.13)估算出距离钚源 r 处的X和γ射线剂量率。

假定中子在钚内的吸收可以忽略不计，则可以应用平方反比定律求出距离钚源 r 处中子剂量率为：

$$\begin{aligned} D_n &= 1.15 \times 10^{-4} (3420P_{238} + 0.030P_{239} + 1020P_{240} + 1700P_{242})M / 4 \pi r^2 \\ &\approx (0.0313P_{238} + 0.00934P_{240} + 0.0156P_{242})M / r^2 \end{aligned} \quad (25.14)$$

若已知钚球的质量及钚同位素的重量百分数，则可根据(25.14)式算出距离钚球 r 处的中子剂量率。

25-2.3 钚分离之后其子体随时间的积累

大多数钚同位素的子体都是长寿命的，因此对剂量的贡献不大。但 Pu^{241} 应除外。图25.3表示 Pu^{241} 的子体对 Pu^{241} 源表面剂量率的贡献。开始时， U^{237} 对表面剂量率的贡献是主要的。过了几周之后， U^{237} 达到平衡，但 Am^{241} 继续积累。当接近四个月时， Am^{241} 对表面剂量率的贡献就与 U^{237} 的贡献相等。在数年之内，随着 Am^{241} 的继续积累，对剂量率的贡献亦继续增加，直到 Am^{241} 最后与母体 Pu^{241} 达到平衡。

表25.4 钚同位素及其子体的 γ 和X射线表面剂量率(拉特/小时)

同位素	α 衰变 γ	内转换X射线	裂变 γ 射线	裂变产物 γ 射线	总和
Pu^{238}	7.6	950	0.12	0.076	960
Pu^{239}	0.075	0.90	8.4×10^{-3}	5.6×10^{-7}	0.98
Pu^{240}	0.0066	4.6	0.037	0.025	4.7
Pu^{241}	0.0090				0.0090
Pu^{242}	0.00013	0.19	0.056	0.044	0.30
Am^{241}	0.10t	0.085t			0.19t
U^{237}	$16(1-e^{-0.102t})$	$0.56(1-e^{-0.102t})$			$17(1-e^{-0.102t})$

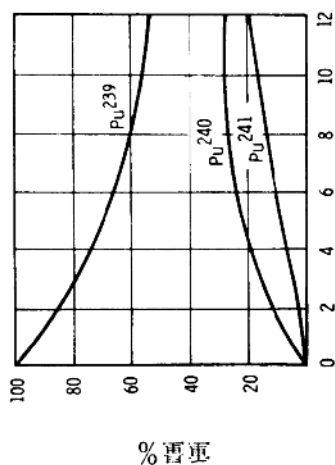
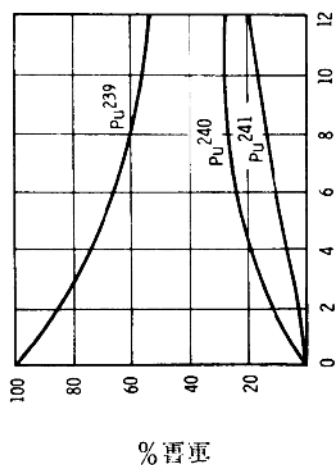
图25.3 Pu^{241} 的子体对表面剂量率的贡献[2]

图25.4 反应堆辐照钍生成的钚同位素成分[12]

25-2.4 反应堆辐照深度的影响

Triplet^[13]计算了反应堆中每吨铀产生的 Pu^{239} 、 Pu^{240} 和 Pu^{241} 的克数与反应堆辐照深度的关系。现将其计算结果表示在图25.4中。在其它资料^[8,11,14]中亦沿用了类似的同位素组成数据。应当知道,动力反应堆生产的钚其精确的同位素成分取决于许多相互关联的有关因素,因此,上面给出的数据仅仅是作为一个例子。Roesch^[12]将图25.4所列数值作为公式(25.5)、(25.6)和(25.8)中的 P_i 值,计算了1公斤钚球所产生的X射线、 γ 射线和中子辐射表面剂量率与堆辐照深度的关系(计算中忽略了 Pu^{238} 和 Pu^{242} 的贡献)。现将计算结果示于图25.5中。图中标有0天的曲线是 Pu^{239} 和 Pu^{240} 对剂量贡献的总和,标有5天的曲线还包括5天之内积累的 Am^{241} 和 U^{237} 的贡献。

由图25.5可得出以下重要结论:第一,屏蔽掉低能X射线可减小剂量率3到30倍,具体减小倍数取决于反应堆辐照深度以及钚分离之后的时间。第二,如果低能X射线可以屏蔽掉,同时在钚被提出来之后立即就进行加工,则可以大大地降低剂量率。

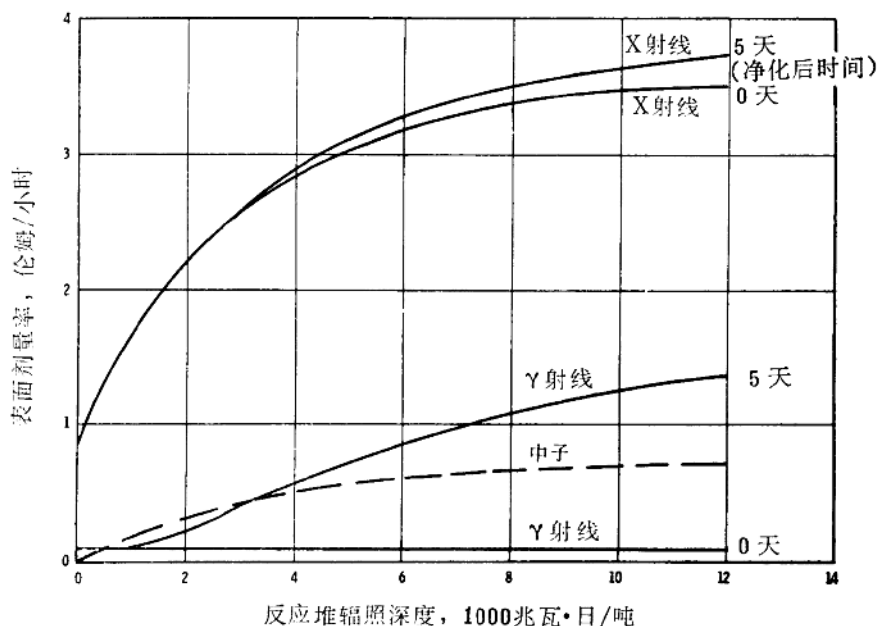


图25.5 钚的 γ 射线、X射线和中子辐射产生的表面剂量率

25-3 剂量监测和控制

曾对钚的表面剂量率作过一些实验测量。但遗憾的是,这些实验测量中所用的钚及其同位素成分均不清楚。Roesch和Watson^[15]曾用电离室测量过钚半球表面的 γ 和X射

线剂量率。在机体组织等效材料深部 7 和 45 毫克/厘米²处,测得的剂量率分别为 2.7 和 0.9 拉特/小时。Dummer^[16]和 Schiavone 等人^[17]测量了穿透过干箱(dry box)手套(厚度为 100-120 毫克/厘米²)的剂量率,其数值约为 0.5 拉特/小时。

25-3.1 全身剂量

全身剂量通常用“单点”个人剂量计的测量结果进行估计。个人剂量计通常佩戴在前胸。虽然有各种类型的 γ 和 X 射线个人剂量计,但最常用的是胶片徽章和袖珍电离室^[18-22]。典型的胶片徽章剂量计装有一系列的过滤片,以便分别测定软 γ 、硬 γ 和 β 射线剂量。图 25.6 是汉福特所用的剂量计,其中还包括测量高水平照射剂量的临界事故剂量计。这种剂量计的工作性能列在表 25.5 中。对于能量在 0.05 到 1.25 兆电子伏之间的 X 和 γ 射线,汉福特剂量计的能量响应与能量无关。因此,除了 L-X 射线和一些低能 γ 射线的剂量外,铀产生的剂量可用单能 γ 射线刻度过的这种个人剂量计测量。在 0.05 到 1.25 兆电子伏能量区间内,通常采用的刻度源是 Ra^{226} (已与子体平衡)、 Co^{60} 和 Cs^{137} 。铀发射的低能 γ 射线和 X 射线的平均能量约为 17 仟电子伏,因此,荧光 X 射线源^[23]和过滤后的 X 射线源^[24]均可用来做 17 仟电子伏的剂量计刻度源。

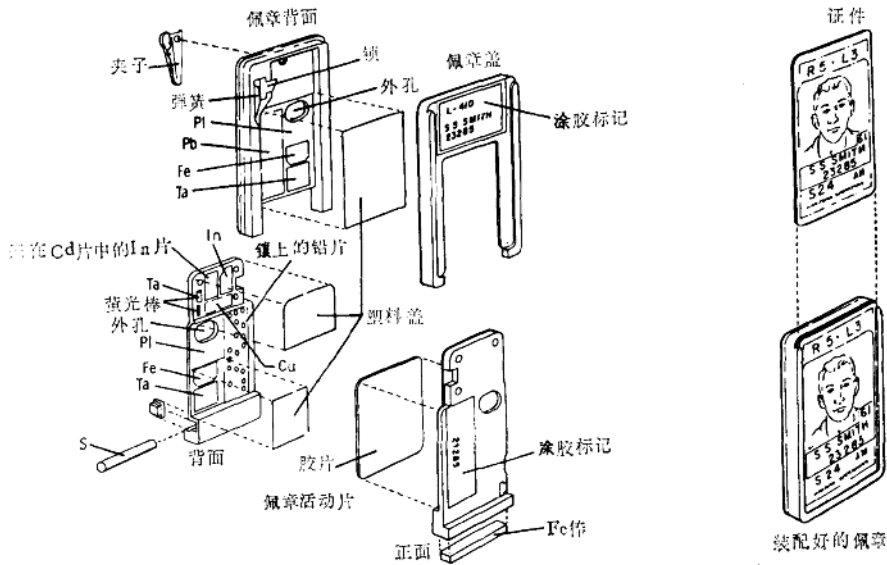


图 25.6 汉福特 β - γ 胶片徽章剂量计^[22]

通常用核径迹胶片^[25-28]来探测铀的快中子。这种胶片是一种对质子很敏感的特殊乳胶片。快中子从含氢乳胶和胶片底版中打出反冲质子,用显微镜就可观察反冲质子产生的径迹。如果知道胶片对所测量的中子谱的灵敏度,则可以确定射入的快中子剂量。在汉福特,是用 PuF 源(参见 25-1.2 节)对核径迹分析胶片进行刻度的。

表25.5 汉辐射胶片佩章剂量计的性能

剂量计元件	辐射类型	能量响应	剂量测量范围	测量方法	刻度能量
常规剂量测量					
胶片	X、 γ	0.01—0.05兆电子伏	0.001—15伦	胶片黑度	0.017兆电子伏
胶片	X、 γ	>0.05兆电子伏	0.015—1500伦	胶片黑度	0.05—2兆电子伏
胶片	β	>0.5兆电子伏	0.025—2000拉特	胶片黑度	铀的 β 辐射
严重辐射事故剂量测量					
无屏蔽的荧光棒	X、 γ	0.02—0.05兆电子伏	5—1000伦	荧光	0.03兆电子伏
钽屏蔽的荧光棒	X、 γ	>0.05兆电子伏	10—10000伦	荧光	0.05—2兆电子伏
钢	中子	0.025—0.3电子伏	1—>2000拉特	In ¹¹⁶ 衰变	0.025电子伏
镭—钢—镭	中子	0.3—2电子伏	1—>2000拉特	In ¹¹⁶ 衰变	0.3—2电子伏
铜	中子	2电子伏—1兆电子伏	1—>2000拉特	Cu ⁶⁴ 衰变	0.05—1兆电子伏
镭—钢—镭	中子	1—2.9兆电子伏	1—>2000拉特	In ¹¹⁶ 衰变	1—2.9兆电子伏
硫	中子	>2.9兆电子伏	1—>2000拉特	P ³² 衰变	3—14兆电子伏

在通常情况下,照射人体的低能 γ 射线和X射线已被屏蔽掉,因此常规控制监测可采用可携式和半可携式仪表,如监测 γ 可用CP和Juno型 γ 辐射仪,监测中子可用Hurst正比计数管^[29]及De Pangher双慢化(double moderator)计数管^[30]。后两种剂量计的读数可以扣除X和 γ 射线的贡献。Hurst剂量计好像是一个Bragg-Gray电离室,它用聚乙烯做内衬的正比计数管作探测器,正比计数管内充乙烯气体。计数管的脉冲高度与剂量成正比,其脉冲输入至一个改进了的定标器^[31]。这种剂量计用内 α 源(internal alpha source)进行刻度^[32]。它对能量为0.2到10兆电子伏的中子均灵敏。

双慢化计数管由一个BF₃计数管和两个围绕BF₃计数管的同心石蜡圆柱壳组成。单有内圆柱壳则是一个中子通量计,有两个圆柱壳就构成一个中子剂量计。适当选择每一个圆柱壳的厚度,就可以测量0.1到5兆电子伏的中子通量和剂量,其响应与能量无关。这种仪器另一个优点是:通过简单的比值测量,就可确定0.1到1.5兆电子伏之间的中子平均能量。仪器用长计数管^[33]进行刻度,刻度时采用了美国国家标准局手册63给出的中子通量—剂量换算常数。在汉福特,这种仪表是可携式的,用来进行中子剂量常规监测。这种仪表也有固定式的,用来作为临界事故剂量计^[34]。

25-3.2 手部剂量

手部剂量通常是根据手腕佩章或胶片指环剂量计的测量值估计的。手腕佩章即是一个戴在手腕上的胶片佩章剂量计。这种手腕佩章剂量计的优点是:它可以装上与常规 β - γ 胶片佩章剂量计相同的滤片,因此可以测量软 γ 、硬 γ 和 β 辐射剂量。此外,手腕佩章佩戴也比较舒适。其缺点是不能测量手掌和手指的剂量,而这些部位的剂量通常是最高。

胶片指环剂量计的优点是,它可以做得足够小,戴上后可以靠近放射源。但是,如果在胶片指环剂量计上装上滤片,则变得很硬,佩戴起来很不舒适,特别是戴在手掌上或放在手套里面就更不舒适。为了佩戴舒适,可将胶片装在柔软的塑料或没有硬壳的橡皮指环内,这就比较舒适了。由于这种指环没有滤片屏蔽,因此剂量计必须在手操作铀这种特殊条件下进行刻度。在汉福特,胶片指环是同 β - γ 胶片佩章剂量计一起放在一块铀片上进行刻度的。先根据胶片佩章测得的数据算出一定的指环胶片黑度对应的 γ 和X射线剂量D,再在胶片指环的镭特性曲线上查出这种黑度所对应的镭剂量D_{Ra}。将D/D_{Ra}比值作为刻度常数,于是,在操作铀时指环剂量计所接受的真实剂量,就等于直接从Ra的 γ 剂量特性曲线上读出的读数乘以D/D_{Ra}比值。

25-3.3 其它紧要器官的剂量

铀的电磁辐射能量包括硬电磁辐射(>40千电子伏)和软电磁辐射(17千电子伏)。如果假定胶片剂量计仅是测量铀表面剂量,于是就产生了一个问题,这就是究竟有多少软电磁辐射实际上射到了人的紧要器官。Watson^[35]用17千电子伏荧光X射线源和人体水模型对这个问题作了实验研究,得出了如图25.7所示的深部剂量曲线。表25.6列出了